W UMa 型食双星 GM Bootis 测光研究*

杨勇，张燕平，付建宁，苍天启
（北京师范大学天文系，北京 100875）

摘 要：GM Boo 是一个已经被发现超过 10 年的短周期（约 0.36 天）相接双星。本研究获得了 GM Boo 在 2010 到 2015 年新观测的多波段时序测光数据及其低色散光谱。从光变曲线中提取了 19 个新的光变极小时刻，并结合历史数据推导出该双星轨道周期增长速率 $dP/dt = 1.06 \times 10^{-7} d \cdot yr^{-1}$。Wilson-Devinney 程序被用来分析 GM Boo 的测光轨道解。得出它是一个典型的 W 次型的过相接双星系统，其质量比约为 q~1.22，相接度约为 f~11%。模型中添加了 2 个黑子拟合不对称的光变曲线，说明此系统具有较强的活动性。

关键词：食双星;轨道周期;光变曲线
中图分类号：P144 **文献标识码**：A **文章编号**：1672-7673

GM Boo(又称 GSC 02016-00830,ROTSE1 J144726.56+224515.0)在 ROSTE 巡天(2000)[1]中被证认为是一个食双星系统，并给出轨道周期是$0.36110300 \pm 0.00001787$天以及 V 星等是 12.230 等。随后，Blattler 和 Diethelm (2001)①对包括 GM Boo 在内的一些双星进行了 CCD 测光观测。他们获得了 GM Boo 的光变曲线，并且第一次给出了 GM Boo 的线性历元公式：

$$Min.I = HJD2{,}452{,}001.4032 + (0^d.361112) \times E \quad (1)$$

文[2]利用 ROTSE-I 数据联合 2MASS 的J, H, K和近红外数据从 ROTSE-I 中证认出 1022 颗明亮的密近双星系统，并且给出了 GM Boo 的$J-H$色指数 0.192，$H-K$色指数 0.057，轨道周期 0.361112 天以及日心距$586 \pm 7pc$。文[3]认为 GM Boo 是一个 W Ursae Majoris 类型的密近双星，同时给出轨道周期是 0.36108 天。

因为到目前为止，还没有任何对这颗食双星进一步详细的研究。所以，从 2010 年到 2015 年，对这颗食双星进行了V和R两个波段的 CCD 测光观测，目的是分析 GM Boo 的轨道周期变化并得到它的测光轨道解。

1 观测和数据处理

从 2010 年 5 月 16 日到 2015 年 2 月 3 日，利用 3 个望远镜对 GM Boo 进行了共计 16 个夜晚的测光观测。其中，5 个夜晚的数据是利用国家天文台兴隆观测站 60cm 反射望远镜观测。该望远镜主焦点焦比是$F/4.23$，有效视场是 $18' \times 18'$，位于主焦点的 CCD 像素是1024×1024和像元分辨率是$1.056''/pixel$。10 个夜晚的数据是利用云南天文台的 60cm 反射望远镜观测。该望远镜观测采用卡塞格林焦点，其焦比是$F/12.5$，有效视场是$12'.5 \times 12'.5$，CCD 型号是 Andor/s DW 436，CCD 像素和像元分辨率分别是2048×2048和$0.37''/pixel$。

*基金项目：国家自然科学基金(11673003); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2014CB845700 和 2013CB834900)资助.
收稿日期：2017-06-02；修订日期：2017-06-19
作者简介：杨勇，男，硕士. 研究方向: 恒星物理. Email: yang_yong@mail.bnu.edu.cn
通讯作者：付建宁，男，教授. 研究方向: 恒星物理. Email: jnfu@bnu.edu.cn
①http://www.konkoly.hu/cgi-bin/IBVSpdf?5125

仅有一个晚上数据是利用位于美国新墨西哥州 Tzec Maun 望远镜远程观测。该望远镜是一个口径 16 英寸的反射望远镜，它的有效视场是$26'.1 \times 17'.4$，焦比$F/9$，CCD 型号是 SBIG STL-6303，相应的像素和像元分辨率分别是3072×2048和$0.51''/pixel$。测光观测日志见表 1。图 1 展示了兴隆 60cm 望远镜拍摄的一幅 GM Boo 的图像。选择 UCAC4 564-052034 作为比较星和 TYC 2016-1086-1 作为校验星。表 2 列出了它们的坐标和V星等。利用 IRAF 程序对该

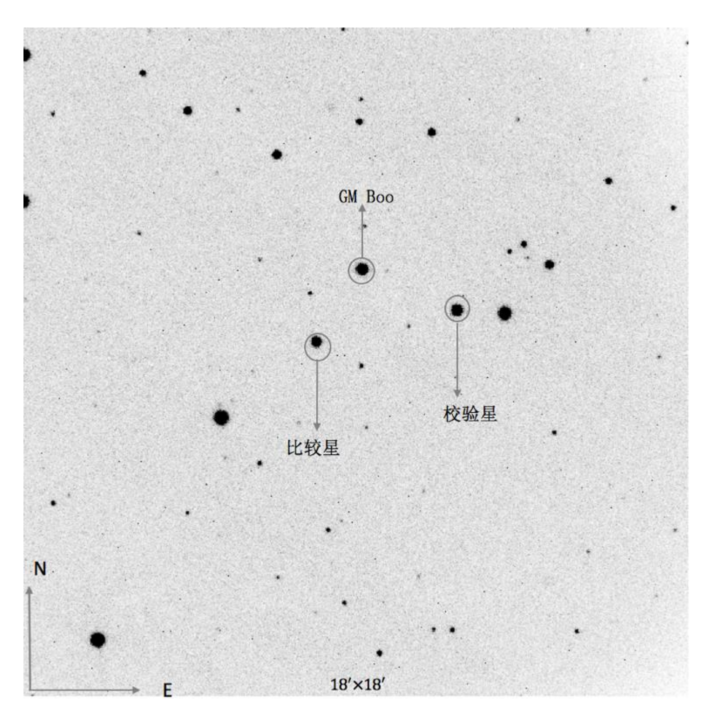


图 1 兴隆 60cm 望远镜观测的一幅 GM Boo 的 CCD 图像
Fig.1 A CCD image of GM Boo observed with the XL 60-cm telescope

双星的测光数据进行了处理，主要过程包括减本底，除平场和孔径测光。

表 1 GM Boo 测光观测
Table 1 Photometric observations of GM Boo

日期	望远镜	滤过片	帧数
2010-05-16	TM16-in	VR	139
2011-05-08	YN60-cm	VR	228
2011-05-09	YN60-cm	VR	254
2011-05-18	XL60-cm	VR	137
2011-05-21	XL60-cm	VR	260
2011-05-22	XL60-cm	VR	330
2012-02-07	YN60-cm	VR	152
2013-01-23	YN60-cm	VR	102
2013-01-31	YN60-cm	VR	112
2013-05-05	XL60-cm	VR	155
2014-02-17	XL60-cm	VR	34
2015-01-25	YN60-cm	VR	352
2015-01-28	YN60-cm	VR	187
2015-01-29	YN60-cm	VR	420
2015-02-02	YN60-cm	VR	213

2015-02-03	YN60-cm	VR	226

2012 年 5 月 14 日，使用位于兴隆站的 2.16-m 望远镜获得了 GM Boo 的低色散光谱。该光谱是用 BFOSC 低色散光谱仪拍摄，其光栅为 G7，狭缝宽度为 1.8''，线色散为 95 $Å/mm$，中心波长为 530nm，波长范围为 380-680nm。利用 IRAF 程序对原始光谱数据进行了处理，得到该双星低分辨率的光谱（见图 2）。与 Pickles 光谱流量库[4]进行对比，GM Boo 的光谱类型初步被证认为是$F3V - F5V$，温度范围约为$6800 \sim 7000K$。

表 2 目标星、比较星和校验星的坐标和星等

Table 2Coordinates and magnitudes of the object, the check, and the comparison star

	名称	赤经(J2000)	赤纬(J2000)	V星等 /mag
目标星	GM Boo	14 47 26.520	+22 45 14.49	11.89
比较星	UCAC4 564-052034	14 47 18.607	+22 43 53.27	12.34
校验星	TYC 2016-1086-1	14 47 20.948	+22 47 40.07	11.96

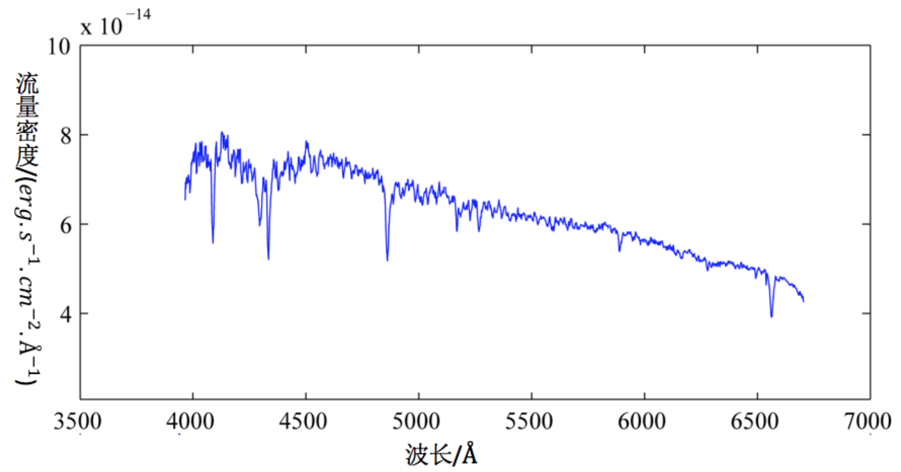


图 2 兴隆 2.16m 望远镜观测的 GM Boo 光谱

Fig.2 The spectrum of GM Boo observed with XL 2.16-m telescope

2 轨道周期变化

利用较差测光，提取了 GM Boo 所有的光变曲线。同时采用最小二乘法对光变极小值附近进行二次拟合，确定了 19 个新的极小值时刻。为了研究轨道周期的变化，从历史数据中收集了 43 个极小值时刻。所有极小值时刻是被列在表 2。利用最小二乘法得到了 GM Boo 新的线性和二次历元公式：

$$Min.I = HJD2,455,332.9007(3) + 0^{d}.36111863(7) \times E \quad (2)$$

$$Min.I = HJD2,455,332.9005(2) + 0^{d}.3611193(1) \times E + 1^{d}.05(2) \times 10^{-10} \times E^{2} \quad (3)$$

因此，根据新的线性和二次历元公式推导该双星的 O-C 值（观测和计算得到的极小值时刻之差），列在表 3。利用表 3 中的列出的$(O\text{-}C)_1$值和圈数 E，描绘了 GM Boo 的 O-C 图（见图 3），目的是分析该双星长期的轨道周期变化。图 3 中，红色实心圆点代表本文的数据，黑色空心圆代表文献中的数据。通过对图 3 中所有数据点进行二次拟合，得到一个向上的抛物线，表明 GM Boo 的轨道周期是正在增加。根据二次历元公式的二次项得到该双星轨道

周期增加的速率是$dP/dE = 1.05 \times 10^{-10} d \cdot cycle^{-1}$或 $dP/dt = 1.06 \times 10^{-7} d \cdot yr^{-1}$。相接双星轨道周期增加表明较小质量子星正在向较大质量子星进行物质转移[5]。

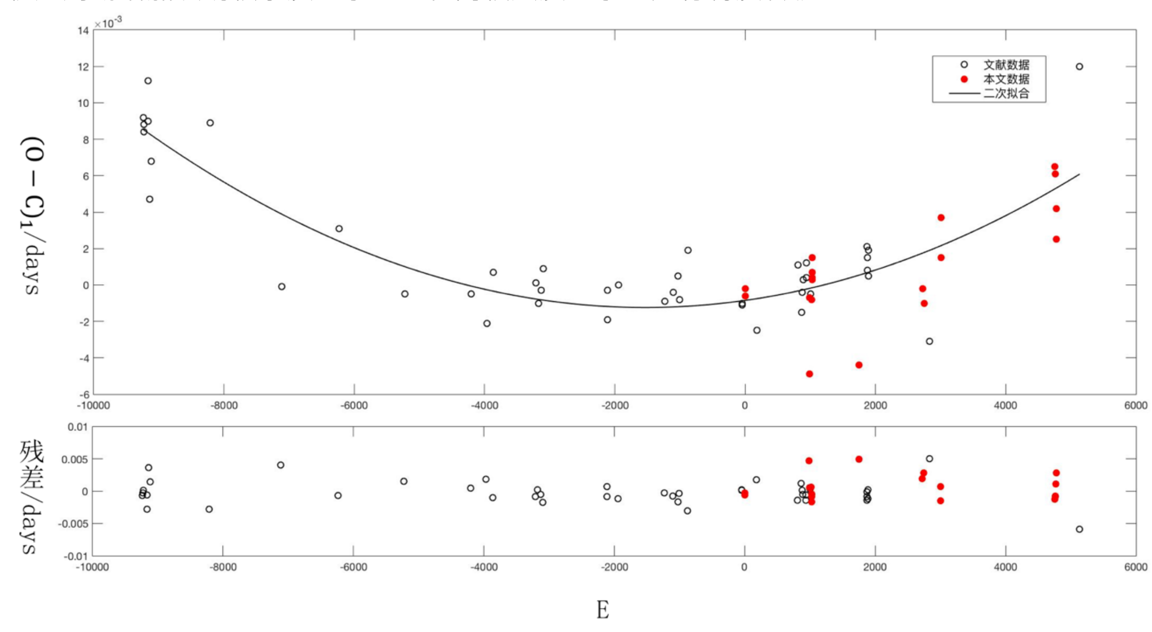


图 3GM Boo 的 O-C 图。实点代表本文的数据，空心圆点代表文献中的数据。实线是对全部数据的二次拟合。
Fig 3 O-C diagram of GM Boo. The solid points represent our data and the open circles represent the data from the literature. The solid curve shows the quadratic fitting.

3 测光数据的轨道解

使用 2015 版的 Wilson-Devinney（W-D）程序[6-9]获得 GM Boo 测光数据的轨道解。用于解轨的测光数据是来自 2011 年兴隆 60-cm 望远镜观测的 3 天数据（见表 1），因为这 3 天数据质量相对较高。对这 3 天测光数据进行相位合并得到在V和R波段具有完整相位覆盖的光变曲线（见图 4）。

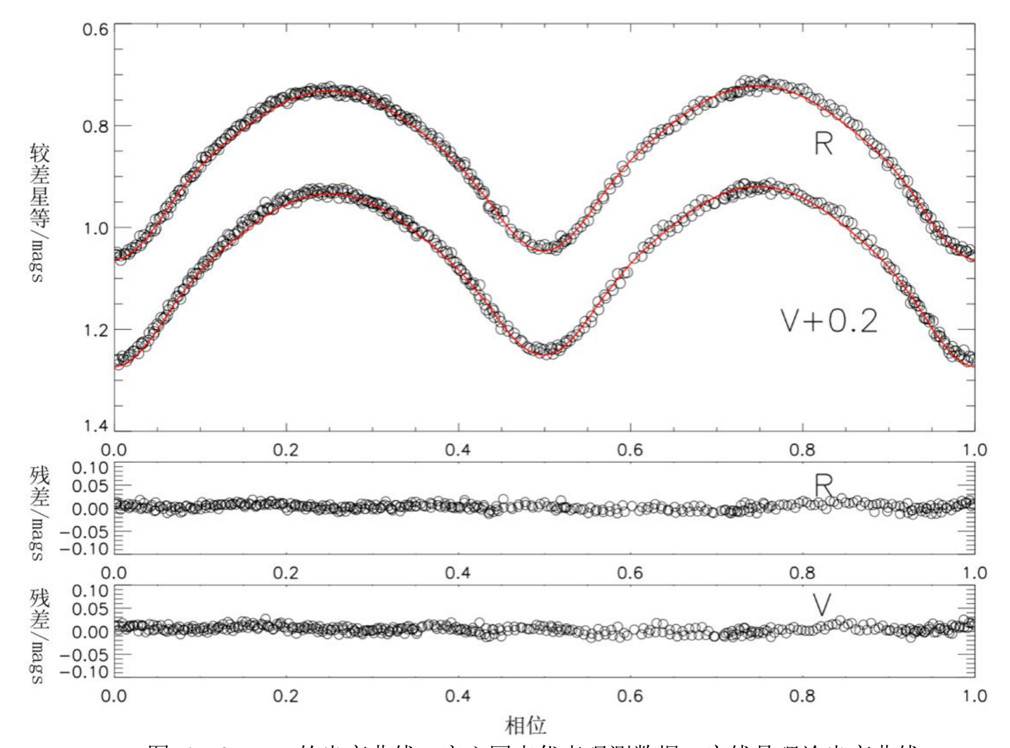


图 4 GM Boo 的光变曲线。空心圆点代表观测数据，实线是理论光变曲线。

Fig.4 Light curves of GM Boo. The open circles represent observational data and the solid lines show theoretical light curves.

GM Boo 是被分类为 W UMa 类型的食双星[4]。因此，使用 W-D 程序的 Mode 3（overcontact binary not in thermal contact）寻找轨道初解。根据 GM Boo 的光谱型是 $F3V-F5V$，假设主星温度$T_1=6900K$，取两子星的重力昏暗系数$g_1=g_2=0.32$[10]，两子星的热反照率$A_1=A_2=0.50$[11]，两子星的热临边昏暗系数和各个波段的临边昏暗系数从文[12]获得（见表 3）。以上参量在解轨过程中固定不变。在 W-D 解轨过程中可以被调整的自由参量包括轨道倾角 i，次星温度 T_2，两子星的表面势能Ω_1和 Ω_2，两子星的质量比$q=m_2/m_1$，以及主星VR波段的相对单色光度。

由于到目前为止没有任何关于该双星质量比($q=m_2/m_1$)的信息，因此执行一个q-search 的过程寻找最佳质量比。q-search 的具体过程是选择一系列 0.3 到 2 之间的q值，间隔步长 0.1，然后对每个q值分别执行 W-D 程序解轨，调整其它自由参量直到它们的校正值小于标准误差以及拟合光变曲线和观测到的曲线之间残差σ达到最小值，最后对每个q值都得到一个相应的残差σ。图 5 描绘了残差σ与质量比q之间的关系，在$q=1.2$找到残差σ的最小值。因此，在$q=1.2$附近寻找最佳的质量比，放开q值进行微调，最终确定最佳的质量比$q=1.22$。最终的解轨结果揭示其质量小但温度更高的子星在主极小时被质量大的子星遮掩。因此，GM Boo 是一个典型的 W 次型过相接双星系统[13]。

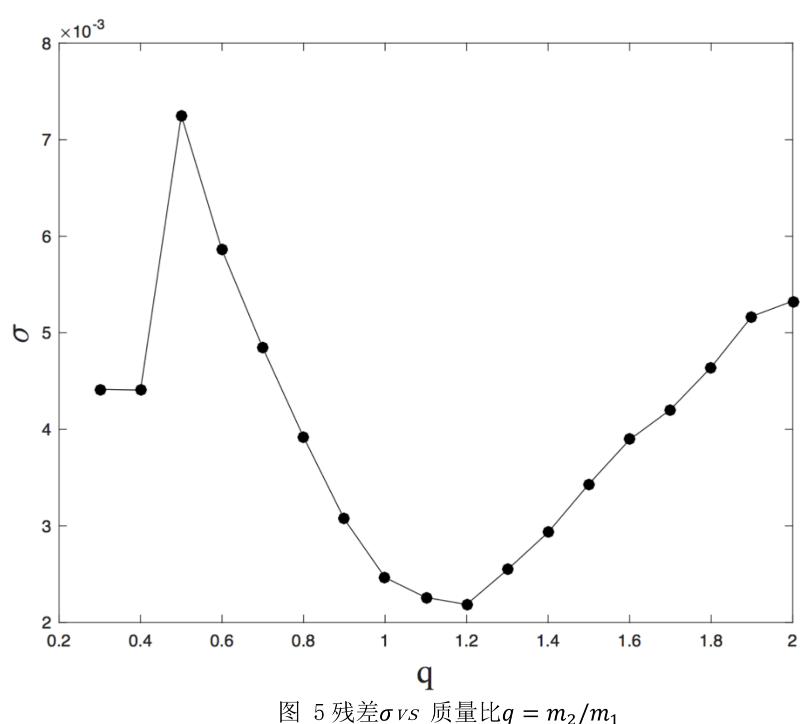


图 5 残差σ vs 质量比$q=m_2/m_1$

Fig.5 The residual σ versus mass ratio $q=m_2/m_1$.

从图 4 光变曲线可以发现位于相位 0.25 处的双星主极大光度比相位 0.75 处的次极大更暗，即存在 O′Connell 效应②。该效应代表在双星表面可能存在黑子或者亮斑。此处假设在大质量子星表面存在两颗黑子，然后调整黑子的经度、纬度、角半径和温度系数拟合光变极大值。最终得到最佳的测光数据的轨道解，列在表 4。图 4 实线描绘了通过轨道解拟合得到的V和R波段理论光变曲线。GM Boo 的几何结构如图 6。

②http://adsabs.harvard.edu/full/1951PRCO....2...85O

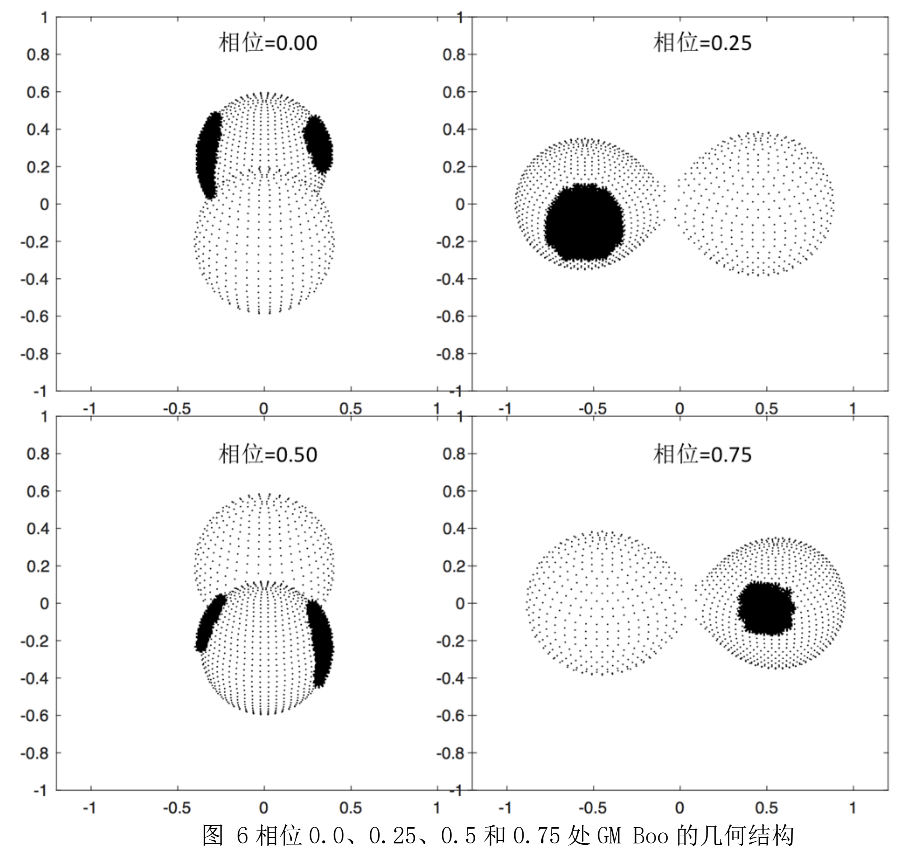


图 6 相位 0.0、0.25、0.5 和 0.75 处 GM Boo 的几何结构
Fig.6 The geometry configurations of GM Boo at the phase 0.0,0.25,0.5 and 0.75, respectively.

4 总结与讨论

通过 CCD 测光观测，获得了 GM Boo 19 个新的光变极小时刻，并推导出它的线性和二次历元公式。另外，通过与 Blattler 和 Diethelm (2001)的光变曲线和历元公式进行对比发现，在本文的观测中，GM Boo 的主极小和次极小时刻发生了反转，即光变主极小的相位对应 Blattler 和 Diethelm 光变次极小相位。类似的现象同样出现在 Kepler 卫星观测的部分食双星中[14]，该现象可能是由双星表面存在的黑子转移造成的。

在 O-C 图上展示了一个开口向上的抛物线，表明这十几年来 GM Boo 的轨道周期一直在增加，相应的周期增加速率是$dP/dE = 1.05 \times 10^{-10} d \cdot cycle^{-1}$ 或$dP/dt = 1.06 \times 10^{-7} d \cdot yr^{-1}$，这与近年来对相接双星周期变化研究的文[15-16]给出的结果相符。认为该双星周期增加可能是由于小质量伴星到大质量伴星之间存在物质转移，但是也不能完全排除第三体的存在，还需进一步的测光观测。

使用 W-D 程序获得了 GM Boo 的测光轨道解，并且因此确认了 GM Boo 是一个典型的 W 次型过相接双星系统。GM Boo 两子星的表面势能是$\Omega_1 = \Omega_2 = 4.0288(\pm0.0025)$，利用$f = (\Omega - \Omega_{in})/(\Omega_{out} - \Omega_{in})$，得出其填充因子$f = 11.11(\pm0.39)\%$，即两子星相接度约为 11%。根据 GM Boo 光变曲线极大值的不对称，表明存在 O' Connell 效应，利用 W-D 解轨得到在大质量伴星表面存在两个黑子。黑子的存在表明其表面存在活跃的磁场活动，说明作为 F 型的恒星，与较晚型的恒星（G、K 型）一样，也存在较强的表面磁活动。

致谢： JNF acknowledges the support from the National Natural Science Foundation of China (NSFC) through the grant 11673003 and the National Basic Research Program of China(973 Program 2014CB845700 and 2013CB834900). The authors acknowledge the support of the staff of the Xinglong 2.16m telescope. This work was partially Supported by the Open Project Program

of the Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences.

参考文献：

[1] Akerlof C, Amrose S, Balsano R, et al. Rotse all-sky surveys for variable stars. I. test fields[J]. The Astronomical Journal, 2000, 119(4): 1901-1913.
[2] Gettel S J, Geske M T, McKay T A. A catalog of 1022 bright contact binary stars[J]. The Astronomical Journal, 2006, 131(1): 621-632.
[3] Hoffman D I, Harrison T E, McNamara B J. Automated variable star classification using the northern sky variability survey[J]. The Astronomical Journal, 2009, 138(2): 466-477.
[4] Pickles A J. A stellar spectral flux library: 1150–25000 Å[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1998, 110(749): 863-878.
[5] Hoffman D I, Harrison T E, McNamara B J, et al. The case for third bodies as the cause of period changes in selected Algol systems[J]. The Astronomical Journal, 2006, 132(6): 2260-2267.
[6] Wilson R E, Devinney E J. Realization of accurate close-binary light curves: application to MR Cygni[J]. The Astrophysical Journal, 1971, 166: 605-619.
[7]Wilson R E. Accuracy and efficiency in the binary star reflection effect[J]. The Astrophysical Journal, 1990, 356: 613-622.
[8] Wilson R E. Binary star light-curve models[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1994, 106(703): 921-941.
[9] Wilson R E, Van Hamme W. Unification of binary star ephemeris solutions[J]. The Astrophysical Journal, 2013, 780(2): 151-167.
[10] Lucy L B. Gravity-darkening for stars with convective envelopes[J]. Zeitschrift für Astrophysik, 1967, 65: 89-92.
[11] Ruciński S M. The W UMa-type systems as contact binaries. I. two methods of geometrical elements determination. degree of contact[J]. Acta Astronomica, 1973, 23: 79-120.
[12] Van Hamme W. New limb-darkening coefficients for modeling binary star light curves[J]. The Astronomical Journal, 1993, 106: 2096-2117.
[13] Binnendijk L. The orbital elements of W Ursae Majoris systems[J]. vistas in Astronomy, 1970, 12: 217-256.
[14] Tran K, Levine A, Rappaport S, et al. The anticorrelated nature of the primary and secondary eclipse timing variations for the kepler contact binaries[J]. The Astrophysical Journal, 2013, 774(1): 81-94.
[15] Qian S B, Li K, Liao W P, et al. The first photometric investigation of the neglected W-UMa-type binary star UZ CMi[J]. The Astronomical Journal, 2013, 145(4):91-96.

[16] Qian S B, Liu N P, Liao W P, et al. First photometric investigation of the newly discovered W UMa-type binary star MR Com[J]. The Astronomical Journal, 2013, 146(146):38-44.

Photometric study of WUMatype eclipsing binary GM Bootis

Yang Yong , Zhang Yanping, Fu Jianning , Cang Tianqi
(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract:GM Boo is a short period (~0.36 days) contact binary system discovered for over 10 years. In this work, new multi-color photometric light curves from 2010 to 2015 and low-resolution spectra of GM Boo are obtained. We extracted 19 new eclipse timings of GM Boofrom the light curves, deriving a long-term increasing rate of the orbital period $dP/dt = 1.06 \times 10^{-7} d \cdot yr^{-1}$ combined with historical data. Photometric solution is derived with the Wilson-Devinney Code, which shows that GM Boo is a typical W-type contact binary with mass ratio of q~1.22 and contact degree of ~11%. Two cool spots are assumed in the model in order to fit the asymmetrical light curves, which indicated that GM Boo is an active system.

Key words:eclipsing binary; orbital period; light curves

表 3 GM Boo 的极小值时刻和 O-C 值

Table 3Minimum times and O-C residuals of GM Boo

HJD(2,400,000+)	Min.	E	$(O-C)_1$	$(O-C)_2$	参考文献[1]
51996.5287	I	-9239	0.0092	0.0004	BBS 125
52001.4034	II	-9225.5	0.0088	0.0001	BBS 125
52001.5836	I	-9225	0.0084	-0.0003	BBS 125
52022.3507	II	-9167.5	0.0112	0.0026	BBS 125
52022.5291	I	-9167	0.0090	0.0004	BBS 125
52033.3584	I	-9137	0.0047	-0.0038	BBS 125
52041.4856	II	-9114.5	0.0068	-0.0018	BBS 125
52367.3979	I	-8212	0.0089	0.0020	BBS 128
52763.3562	II	-7115.5	-0.0001	-0.0052	BBS 129
53081.5055	II	-6234.5	0.0031	-0.0008	BBS 130
53445.5102	II	-5226.5	-0.0005	-0.0031	IBVS 5653
53815.4769	I	-4202	-0.0005	-0.0022	BAVM 186
53900.8800	II	-3965.5	-0.0021	-0.0036	OEJV 0162
53936.4531	I	-3867	0.0007	-0.0006	IBVS 5781
54174.4301	I	-3208	0.0001	-0.0008	IBVS 5781
54186.5265	II	-3174.5	-0.0010	-0.0018	BAVM 186
54201.5136	I	-3133	-0.0003	-0.0012	BAVM 186
54213.4318	I	-3100	0.0009	0.0001	BAVM 186
54570.3954	II	-2111.5	-0.0019	-0.0022	BAVM 201
54570.5776	I	-2111	-0.0003	-0.0005	BAVM 201
54631.0653	II	-1943.5	0.0000	-0.0002	VSB 48
54888.9036	II	-1229.5	-0.0009	-0.0009	IBVS 5929
54933.5024	I	-1106	-0.0004	-0.0003	BAVM 209
54961.8511	II	-1027.5	0.0005	0.0006	IBVS 5894
54968.5305	I	-1009	-0.0008	-0.0007	BAVM 209
55015.4787	I	-879	0.0019	0.0020	IBVS 5920
55315.3853	II	-48.5	-0.0011	-0.0009	BAVM 214
55315.5660	I	-48	-0.0010	-0.0008	BAVM 214

55332.7195	II	-0.5	-0.0006	-0.0004	This paper
55332.9005	I	0	-0.0002	0.0000	This paper
55398.4414	II	181.5	-0.0025	-0.0023	IBVS 5960
55625.5890	II	810.5	0.0011	0.0012	OEJV 0160
55644.9063	I	864	-0.0015	-0.0014	IBVS 5992
55649.6020	I	877	-0.0004	-0.0003	OEJV 0160
55654.4777	II	890.5	0.0003	0.0004	BAVM 220
55671.4512	II	937.5	0.0012	0.0013	BAVM 220
55672.5338	II	940.5	0.0004	0.0005	OEJV 0160
55690.0428	I	989	-0.0049	-0.0048	This paper
55690.2275	II	989.5	-0.0007	-0.0007	This paper
55695.8251	I	1005	-0.0005	-0.0004	IBVS 5992
55700.1582	I	1017	-0.0008	-0.0007	This paper
55703.0484	I	1025	0.0004	0.0005	This paper
55703.2292	II	1025.5	0.0007	0.0007	This paper
55704.1316	I	1028	0.0003	0.0003	This paper
55704.3134	II	1028.5	0.0015	0.0016	This paper
55965.3968	II	1751.5	-0.0044	-0.0045	This paper
56008.5570	I	1871	0.0021	0.0020	OEJV 0160
56009.4585	II	1873.5	0.0008	0.0006	BAVM 228
56009.6398	I	1874	0.0015	0.0014	BAVM 228
56015.4167	I	1890	0.0005	0.0003	BAVM 228
56015.5986	II	1890.5	0.0019	0.0017	BAVM 228
56316.4089	II	2723.5	-0.0002	-0.0008	This paper
56324.3527	II	2745.5	-0.0010	-0.0016	This paper
56355.5875	I	2832	-0.0031	-0.0037	OEJV 0160
56418.0657	I	3005	0.0015	0.0008	This paper
56418.2485	II	3005.5	0.0037	0.0030	This paper
57048.4044	II	4750.5	0.0065	0.0043	This paper
57051.2930	II	4758.5	0.0061	0.0039	This paper
57052.3763	II	4761.5	0.0061	0.0039	This paper
57056.3468	II	4772.5	0.0042	0.0020	This paper
57057.4284	II	4775.5	0.0025	0.0003	This paper
57186.7186	II	5133.5	0.0120	0.0094	JAAVSO 44-1

[1] BBS=Bulletin der Bedeckungsveraenderlichen-Beobachter der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft.; BAVM=BAV- Mitteilungen (Berliner/Bundesdeutsche Arbeitsgemeinschaft fur Veranderliche Sterne); IBVS=Information Bulletin on Variable Stars; OEJV=Open European Journal on Variable Stars;VSB=Variable Star Bulletin (Japan); JAAVSO=Journal of the American Association of Variable Star Observers.

表 4 GM Boo 的轨道解

Table 4 Orbital solution of GM Boo

参数	最佳拟合值	误差
$q = m_2/m_1$	1.220	± 0.002
$T_1\ (K)$	6900[a]	
$T_2(K)$	6725	± 11
$g_1 = g_2$	0.32[a]	
$i(°)$	64.452	± 0.072
$A_1 = A_2$	0.50	
$\Omega_1 = \Omega_1$	4.0288	± 0.0025
$X_1 = X_2$(bolo)	0.172[a]	
$Y_1 = Y_2$(bolo)	0.553[a]	
$x_1 = x_2$(V)	0.061[a]	
$x_1 = x_2$(R)	0.033[a]	
$y_1 = y_2$(V)	0.726[a]	
$y_1 = y_2$(R)	0.725[a]	
$L_1/(L_1 + L_2)$ (V)	0.485	± 0.002

$L_1/(L_1+L_2)$(R)	0.477	$\pm$0.001
r_1(pole)	0.3477	$\pm$0.0002
r_1(side)	0.3657	$\pm$0.0003
r_1(back)	0.4019	$\pm$0.0005
r_2(pole)	0.3811	$\pm$0.0004
r_2(side)	0.4029	$\pm$0.0005
r_2(back)	0.4371	$\pm$0.0008
Spot1 latitude(rad)	1.4835	
Spot1 longitude(rad)	4.7124	
Spot1 radius(rad)	0.1745	
Spot1 temp factor	0.9	
Spot2 latitude(rad)	1.2217	
Spot2 longitude(rad)	1.3962	
Spot2 radius(rad)	0.349	
Spot2 temp factor	0.93	
f	0.1111	$\pm$0.0039
$\overline{(O-C)^2}$0.013		

Note. [a] Assumed